

高温センシングシステムの研究 第1報 演算増幅器の高温特性

田村 洋一*・橋口 慶**・仲井 淳哉***

High Temperature Sensing System —Characteristics of an Operational Amplifier at High Temperatures—

Yoichi TAMURA, Kei HASHIGUCHI and Junya NAKAI

Synopsis

Input offset voltages of high temperature operational amplifiers and conventional operational amplifiers were investigated between room temperature and 200 degrees Celsius. The conventional operational amplifier is made of bipolar transistor. Input offset voltage becomes very large when circumstance temperature is over 150 degrees Celsius. The high temperature operational amplifiers are integrated on SOI (Silicon on Insulator) substrate. The characteristics of input offset voltages versus temperature are good. But absolute values of input offset voltages are large compared with the conventional operational amplifier at room temperature.

1. 緒 言

高温環境下で計測システムを動作させる必要性は従来あまりなかったが、近年産業の高度化に伴いいろいろなニーズが発生している。一番仕様の厳しいニーズは金星や水星探査の衛星であろう。太陽に近づくので衛星全体が必然的に高温に耐える必要がある。当然無人探査機であるので、各種の観測装置が搭載されており、そこに含まれるセンシングシステムは500°C程度の耐熱性が要求される。¹⁾

また石油探査においては、開発井が深くなる一方なので200°C程度の高温に耐える必要がある。⁶⁾

最近では探査する井戸の先端が任意の向きになるように制御し、探索効率を高めることが試みられている。このために先端ドリルの向きを制御しながら掘る技術が要求され、ドリルの向き、位置などの信号を地上に伝送するためのセンシングシステムを探索用ドリル先端に搭載する必要が生じている。地熱発電においても同じような必要性があり、耐熱温度は200～300°Cといわれている。¹⁾

身近な例では、航空機を軽量化するための分散制御が研究されており、そのために高温に耐えるセンシングシステムの要求が存在する。²⁾ また自動車においては、エレクトロニクス化が急速に進んでいるが、乗車空間をより広く取りたいという要望の関係でエレクトロニクスを活用するシステ

* 機械工学科情報制御工学コース教授

** 大学院電子情報学専攻

***アロックス・サンワ㈱

1999年11月18日受付

ムが徐々にエンジンルーム内に押しやられる傾向にある。この場合もセンシングシステムを高温環境下で動作させる必要性が生じている。

高温下でセンシングシステムを動作させるには、どうしても高温環境で動作可能なエレクトロニクス素子が必要となってくる。センシングシステムではアナログ素子が重要な信号処理手段に用いられる。またデジタル素子よりはるかに特性など厳しい性能が要求される。そこで一番使用頻度の高いと思われる演算増幅器を対象を選び、その高温特性を研究することを目的とする。

2. 高温センシングシステムの構成

センシングシステムの主な構成要素は、図1に示すように①センサ ②信号処理（主にアナログ信号処理） ③計算機で構成される。この他に電源供給等も含まれるがここでは省略している。高温センシングシステムの定義を明確にするために、システムのいろいろな構成方法について考察する。

図1(a)は一般に使用されているセンシングシステムで、センサ、信号処理、計算機はすべて常温の環境下で動作している。図1(b)はセンサ単体のみ高温部にさらされている状況である。この分類

に属するものの代表例は熱電対、白金抵抗体などによる接触型の温度測定である。その他にも高温での歪み測定、差動トランスや渦電流型センサを用いた変化測定などが実用化されている。これらはセンサの物理的性質の変化が高温で有効に利用でき、かつ増幅などを行わなくても信号の伝送が行えるセンサに限定される。以上の2つの構成形態は、ここでは高温センシングシステムとは定義しない。図1(c)においては、高温環境下のセンサをインテリジェント化し、必要な信号処理を行った後に常温部の計算機に信号を伝送する。またセンサの出力信号を用いてローカルで制御する分散システムもこの分類に属する。²⁾ 図1(d)は全ての構成要素が高温環境下で動作するシステムであり、宇宙探査機などでその必要性は認められるものの、現在の技術レベルで実施するとすれば、非常に高価なシステムとなる。したがって我々が研究の対象としている高温センシングシステムは図1(c)の形態を想定している。

図1(c)の形態でも信号処理の程度は大きく変化する。現在実用化されている高温用センサは、センサ単体に対していろいろな工夫がなされている。しかしこれらは特定の用途を想定したものであり、汎用性がない。高温で動作可能なセンサを開発するためには、センサ近傍で信号処理がなされることが必要である。またセンサのインテリジェント化や高温部でセンシングしてかつ制御するためには、コントローラも高温で動作する必要がある。

高温センシングシステムの研究の第1歩として、アナログ信号処理用として一番汎用性のある演算増幅器（以後オペアンプと呼ぶ）を取り上げ、その温度ドリフトを調査し、その結果を考察した。

3. 実験対象の選定と実験条件

従来から半導体部品は民生用とMIL規格用が存在していた。MIL規格用はパッケージがセラミックか金属を使用するのに対して、民生用はプラスチックを用いている。半導体の製造方法は基本的に同じであるが、選別や個々のチップをトリミ

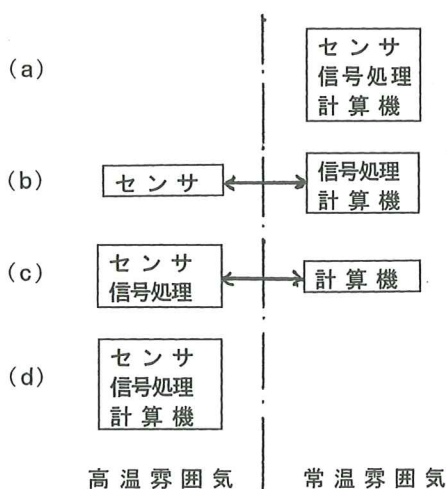


図1 センシングシステムの構成図

表1 実験に使用したオペアンプの絶対最大定格

オペアンプ型番 (用途)	OPA27GP (民生用)	OPA27AZ (MIL 規格)	OPA27BZ (MIL 規格)	HT1104 (高温用)
電源電圧 (V)	±22	±22	±22	15
保存温度 (°C)	-55~+125	-65~+150	-65~+150	-65~+325
動作温度範囲 (°C)	-40~+ 85	-55~+125	-55~+125	-55~+225

表2 実験に使用したオペアンプの電氣的仕様

オペアンプ型番 (用途)	OPA27GP (民生用)	OPA27AZ (MIL 規格)	OPA27BZ (MIL 規格)	HT1104 (高温用)
入力オフセット電圧 Max (μV)	±100	±25	±60	±2000
オフセット電圧温度ドリフト Max ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	±1.8	±0.6	±1.3	±15
雑音 $f_o=10\text{Hz}$ $f_o=1\text{kHz}$ ($\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)	8.0 4.5	5.5 3.8	5.5 3.8	200 30
オープンループゲイン (dB)	124	125	125	115

ングすることで、特性をそろえたものが MIL 規格用と認識している。この分類に属するものとして、バーブラウン社の超低ノイズ・高精度オペアンプとして市販されている OPA27 シリーズを実験対象に採用した。本シリーズのオペアンプの主な仕様を表1, 表2に示す。³⁾ 型番の末尾の2文字の英字は、最初が特性の違いを、2番目がパッケージの種類を示す。特性はAが良く、Bはそれより劣ることを意味する。またパッケージ種類はPはプラスチックパッケージを意味し、Zはセラミックパッケージを意味する。最大動作温度は民生用で85°C, MIL 規格品で125°Cである。このオペアンプはバイポーラ型アナログ IC であり、IC 内の各素子は pn 接合の逆バイアス電流が微弱であることを利用して素子間分離が行われている。

近年電氣的に絶縁性のある酸化膜の上に活性シリコン層を形成した SOI (Silicon On Insulator) ウェハに IC を製作する方法が進歩している。このウェハを用いると IC の素子間分離が非常に容易になる。この性質を高温用に活用した半導体素子が市販されはじめた。市販品のうちからオペア

ンプを実験用に採用した。その主な仕様も表1, 表2に示している。⁴⁾ 動作温度の上限は+225°Cである。

実験を行うとき、特定のニーズがあれば上限温度はそのニーズから決まってくるが、現在対象をしばらく実験を行っているので、上限温度の目標は表1の動作温度上限を考慮して200°Cと設定した。

4. 実験方法

オペアンプの特性には静特性と動特性がある。センサの動特性としては、それほど高周波成分を要求されないものが多いので、今回の実験は静特性に注目して行った。ここでは静特性のうち、温度ドリフトに着目して実験を行った。実験に使用した評価回路を図2に示す。オペアンプと抵抗体のみで10倍の反転増幅器を構成し、入力側を短絡し、出力側の電圧変化を実測し、入力側に換算している。この回路では比較的低いフィードバック抵抗を用いているので、入力オフセット電圧の影

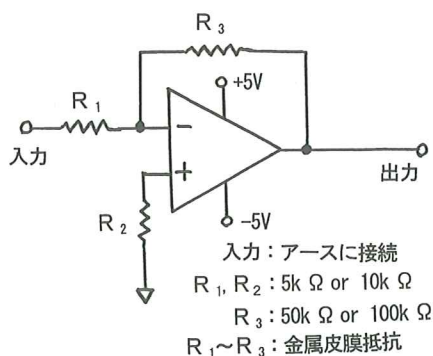


図2 オペアンプの高温ドリフト評価回路

響を測定することになる。入力オフセット電流の影響が少ないように、オペアンプの+入力端子は抵抗を介してアースに接続してある。オフセット電圧を入力値に換算するとき増幅度を用いるので、抵抗の温度特性も影響する。これに関しては大きな影響がないことを確認している。

オペアンプを200°Cまで動作させるためには実装に関しても配慮する必要がある。プリント基板、ハンダ材料、配線材料、抵抗体などが主なものである。プリント基板の母材としてはポリイミドを使用した。ハンダは固相熔融温度285°Cの高温ハンダを用いた。配線材料はテフロン被覆の線材を用い信号伝送にはシールド線を使用している。テフロン被覆のケーブルの連続使用温度は260°C程度であり、十分余裕がある。抵抗体に関しては、連続使用で200°C以上を保証するものは日本製では入手しにくい。アメリカでは市販されており入手可能であるが高価なため、ここでは定格電力では125°C動作保証であるが、微少電力であれば175°C

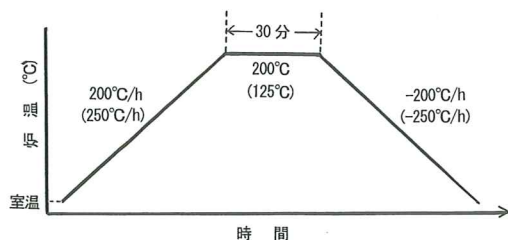


図3 高温ドリフト評価に用いた温度パターン

まで使用可能な金属皮膜抵抗体を使用した。

実験はオペアンプを搭載したプリント基板を恒温槽内に挿入し、図3に示す温度パターン中でのオペアンプの直流出力電圧ドリフトを測定した。電源供給は恒温槽外部から高温用シールド線を通して供給している。恒温槽内はファンにより強制的に攪拌されているが、炉温とプリント基板の温度は一致しないので、プリント基板近傍の温度を白金測温抵抗体で測定し、オペアンプの温度とした。ドリフト測定を実施した実験回数は各オペアンプにより異なるので、一覧を表3に示す。表3には実験したオペアンプの回路数もあわせて示した。

5. 実験結果

高温用オペアンプの実験結果、従来型のオペアンプの実験結果の順に報告する。

5.1 高温用オペアンプの実験結果

高温用オペアンプは14ピンDILセラミックパッケージに4個のオペアンプが内蔵されている。まず図2に示した回路の入力に交流電圧を印可し、回路が正常に動作することを確認する。次に入力を短絡し、恒温槽内にいれて出力のオフセット電圧の変動(ドリフト)を実測した。室温から200°Cまでの間、5°C毎に測定を行っている。各温度で15回直流出力電圧を測定し、その平均値を求めた。15回の測定値の標準偏差を求め、測定データに大きなばらつきがないことを確認している。図3の温度パターンにしたがって10回繰り返し測定を実

表3 高温ドリフト調査実施回数

オペアンプ 型番	最高温度		備考 テスト数
	200°C	125°C	
OPA27GP	2回	2回	2回路
OPA27AZ	2回	5回	1回路
OPA27BZ	2回	5回	1回路
HT1104	10回		4回路

ただし HT1104 は1パッケージ内に4回路あり

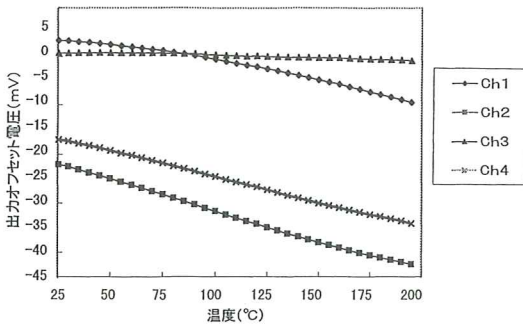


図4 高温用オペアンプの出力オフセット電圧の温度特性

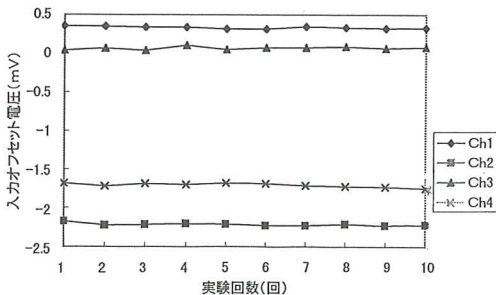


図5 室温での入力オフセット電圧の経時変化

施し、各温度での10回の平均値を求めた。その結果を図4に示す。温度に対してほぼ直線的に出力オフセット電圧の絶対値は増加している。しかし個々の回路で特性が相当ばらついていることも実験結果からいえる。室温でのオフセット電圧の値も個々のオペアンプで相当ばらついており、最大約25mVの差がある。入力に換算して2.5mVであり従来のオペアンプに比べると大きな値であるが、メーカーの電氣的仕様内にはおさまっている。

10回の温度履歴の間に変化がみられるか、実験結果から検討した。室温での入力換算のオフセット電圧について求め、10回の温度履歴に対する変化を図5に示した。入力オフセット電圧は0.5mV弱から2mV強であり、仕様値が代表値で2mVであるから、ほぼ満たしている。また最大動作温度以内で使用しているので、10回の温度履歴を与えたことでは、変化が見られないのは当然であろう。

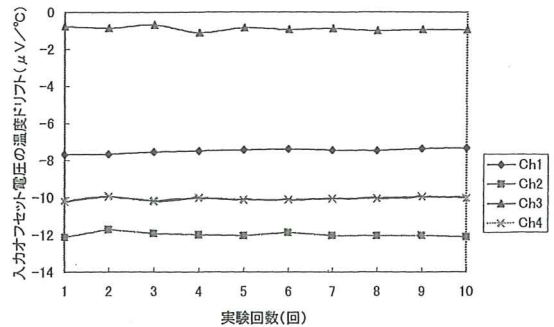


図6 入力オフセット電圧の温度ドリフト経時変化

温度ドリフトの実測値は以下のように求めた。オペアンプの直流出力電圧の最大値と最小値の差を、温度幅で割り、温度ドリフト ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) を算出する。次に増幅度10で除算し、入力値に換算する。その結果を図6に示す。 $-1 \sim -12 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ であり、従来のオペアンプに比べてやはり大きな値を示すが、メーカー仕様内の値である。この結果も10回程度の温度履歴では変化が現れていない。

5. 2 従来型オペアンプの実験結果

最初に MIL 規格オペアンプ、民生用のオペアンプを最高温度約125°Cの温度履歴を図3にしたがって与えた。民生用は2回路(各々をOPA27GP1とOPA27GP2と呼ぶ)のオペアンプに対して、2回の温度履歴を与えた。MIL規格品はグレードの異なるオペアンプを1回路ずつ、5回の温度履歴を与えた。

これらの実験結果を図7に示す。民生用オペアンプに関しては、2回路について実験しているが、両者で差はほとんどなかったので、2回路の平均値を示している。図の縦軸はオペアンプの出力オフセット電圧であり、この結果から求めた入力オフセット電圧、入力オフセット電圧温度ドリフトともに仕様内の値である。民生用オペアンプがMIL規格オペアンプより特性が良いのは偶然であろう。また民生用の最大動作温度は85°Cであるが、短期間に125°Cまで使用してもオフセット電圧に関しては問題ない。図4の高温オペアンプの結果と比較すると、出力オフセット電圧が約2桁低

い。

次に MIL 規格, 民生用のオペアンプを最高温度200°Cの温度履歴を図3にしたがって与えた。実

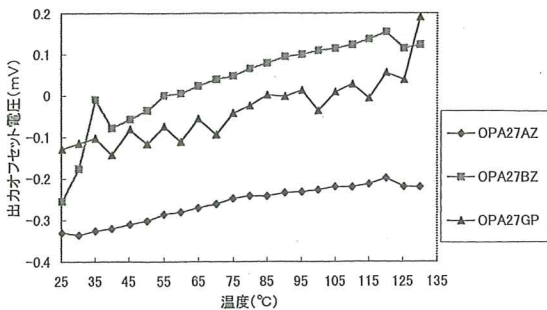


図7 従来型オペアンプの出力オフセット電圧の温度特性
(1)室温～125°C

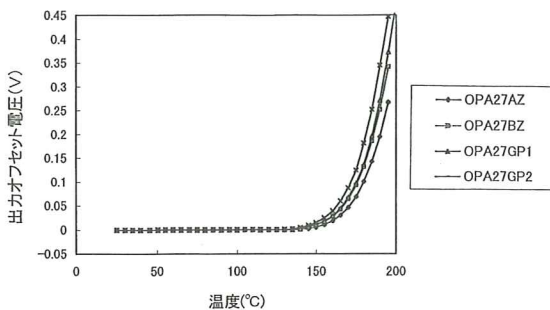


図8 従来型オペアンプの出力オフセット電圧の温度特性
(2)室温～200°C

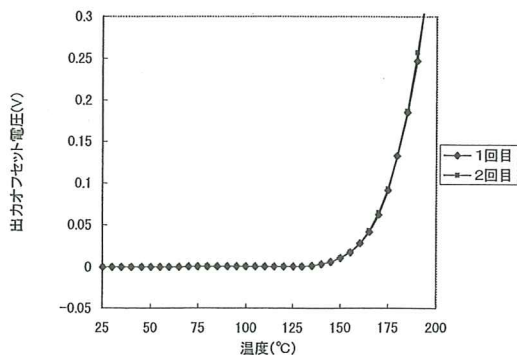


図9 民生用オペアンプの出力オフセット電圧の再現性

験のねらいは, 動作温度の絶対最大定格値を大幅に越えて動作させたらどんな現象が発生するかを調査することである。

各オペアンプについて2回の温度履歴を与えたときの, 出力オフセット電圧値の2回の平均値を図8に示す。図7に比べて, 縦軸の目盛りが約1000倍になっている。150°C近くの温度で急激に出力オフセット電圧が上昇する。150°C以上でのオフセット電圧の絶対値は, MIL 規格品と民生用と比較するとたしかに MIL 規格品の方が小さい。また MIL 規格品の中でも規格通りの特性を示している。しかし3つの差はそれほど大きくはない。

図9に民生用オペアンプについて, 2回の温度履歴を与えたときの出力オフセット電圧の変化を示すが, 2回の測定結果は完全に重なっている。動作温度の絶対最大定格値が85°Cの民生用オペアンプを200°Cまで動作させても, 短期間であれば特別な現象が現れるということとはなかった。図には示していないが, MIL 規格品についても同じような結果が得られた。

6. 考 察

6. 1 抵抗値の温度変化が実験結果に与える影響

オペアンプの特性評価は, 図2の出力電圧を実測し増幅度で割り算し, 入力換算値を求めている。図2の回路では抵抗の絶対値の変化は, 特性評価に影響を与えないが, 抵抗比が増幅度になるので, 抵抗比が影響を与える。実験に使用した抵抗体と同じ規格の抵抗体を単独で温度特性を求めた結果を図10, 図11に示す。縦軸は, 公称値(10k Ω , 100k Ω)に対する偏差を百分率で表示している。

使用した抵抗は金属皮膜抵抗である。主な仕様は, 定格電力1/4W, 抵抗値許容差 $\pm 0.05\%$, 温度係数 $\pm 25\text{ppm}/^\circ\text{C}$ である。10k Ω , 100k Ω を各5本ずつ測定した。抵抗体は購入時期が同じであるので, 同一ロットと判断される。5本の特性は良く一致している。オペアンプと一緒に用いた抵抗体も同時に購入したものであるため, ほぼ同じ特性

と想像できる。したがって増幅度は室温から200°Cの間で最大で約0.4%変化すると想定できる。この値は小さな値であるので、オペアンプの高温ドリフトの実験結果に増幅度の補正を加える必要はないと判断できる。

6. 2 従来型のオペアンプの高温特性

バイポーラトランジスタを用いた従来型オペアンプの出力オフセット電圧は、150°C近傍から急激に増加する。各オペアンプの出力オフセット電圧は低い温度では、ゼロ点を上下するので全てに10 mVを加算したのち、その対数値と絶対温度の逆数との関係を求めた。その結果を図12に示す。約150°C以上では、 $1/T$ に比例し、約150°C以下では一定値になっている。両者を直線近似し、その交点を求めると、民生用のOPA27GPは140°C、MIL規格品のOPA27BZは142°C、OPA27AZは147°Cであり、メーカのグレードの順に交点温度は高くなっている。

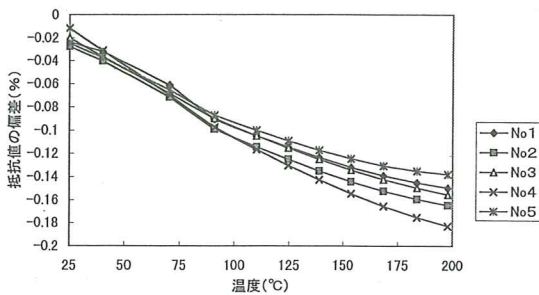


図10 金属皮膜抵抗 (10kΩ) の温度特性

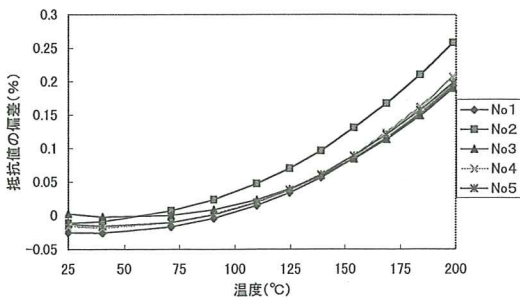


図11 金属皮膜抵抗 (100kΩ) の温度特性

以上の現象は次のように考えれば理解できる。半導体集積回路においては、1つのシリコンチップに多数の回路を形成するとき各々の回路は絶縁されている必要がある。現在のICはpn接合の逆バイアス電流が非常に小さいことを利用して素子間絶縁すなわち素子分離を行っている。この原理を構造が簡単なCMOS回路について図13に示す。⁵⁾nチャンネルMOSはP型シリコンに形成されているが、pチャンネルMOSは、P型シリコン上に形成されたn型ウエルに形成されている。CMOSはソース(S)に対してドレイン(D)が正電圧になるように電源が印可される。したがってn型ウエルはP型シリコンに対して正のバイアスが印可されるので、逆バイアスになり漏れ電流は非常に小さな値となるので、pチャンネルMOSとnチャンネルMOSは電気的に絶縁された状態になる。しかしICの温度が上昇するとこの逆バイアス電流は指数関数的に増加し、実験に使用したオペアンプでは約150°Cを越えると無視できな

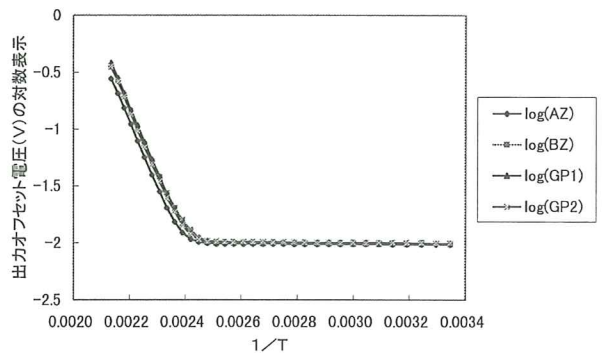


図12 従来型オペアンプの出力オフセット電圧と絶対温度の逆数との関係

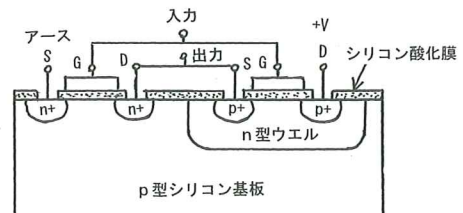


図13 CMOS回路の模式図

くなり、出力オフセット電圧が急激に増加するものと考えられる。したがってオペアンプを含む従来型の集積回路では素子間分離を pn 接合の逆バイアスで行っている以上、集積回路に使用される部品や組み立て方法など工夫しても、動作温度の上限は逆バイアス電流が増加する温度で制限されることは明らかである。

また従来型のオペアンプの分類は、以上の実験データから次のように考えられる。民生用オペアンプはプラスチックパッケージを使用し、MIL 規格品はセラミックパッケージまたは金属パッケージを使用する。半導体の中身は同じであるが、個々に選別することで特性がそろいかつ平均値に近いものを MIL 規格品にするものと推定される。

6. 3 高温用オペアンプの構造

従来型のオペアンプは素子間分離を pn 接合の逆バイアスを利用しているので、おのずと動作温度の上限が決まってしまう。しかし近年半導体デバイスの高性能化を目的に SOI (Silicon On Insulator) 技術が進歩している。SOI 技術で製作されたシリコンウエハを用いると、高集積化、低消費電力化、高速化、高耐圧化、高温化などが期待されて技術開発が進められている。ここで使用した高温用オペアンプは SOI 技術を用い、高温動作が可能のように製作されたものである。

SOI 技術とは絶縁物の上に形成されたシリコン上に集積回路を形成し、素子間分離はこの絶縁物を利用する。SOI 技術を利用して製作された CMOS 回路の模式図を図14に示す。図13と比較すると、絶縁物で素子間分離が行われているので、このことが動作温度の上限を決定する要因にはな

っていない。したがってオフセット電圧の温度特性が図4に示すように素直な特性を示す。しかしながら実験結果から求められた特性は、従来型のオペアンプに比べて劣ることは確かである。高温用オペアンプは開発されて間がないので、回路設計や生産技術がまだ未熟であるものと推定される。今後需要が伸び、使用量が増えれば特性も改善されていくものと推定される。

7. 結 言

SOI 技術を用いて作られた高温用オペアンプの温度特性を従来型のオペアンプと実験により比較研究した。その結果、高温用オペアンプは200°Cまで十分に使用可能であることが判明した。しかしながら特性のばらつきも大きく、オフセット電圧の絶対値も大きく、高温センシングシステムといえども性能を低下しては実用化のさまたげとなるので、改善が必要であろう。

一方従来型のバイポーラ型オペアンプは、約140°C以上になると IC 内の素子間分離が不十分になり、出力オフセット電圧が急激に上昇するので、これ以上の温度での連続使用は制限されるであろう。また民生用オペアンプと MIL 規格品を比較すると、短期的には民生用オペアンプでも MIL 規格品と同等に使用できることが判明した。民生品はプラスチックパッケージを使用しているので、耐久性に関しては実験にて確認する必要がある。

謝 辞

最後に高温センシングシステムのニーズに関する討論とサンプルの提供をこころよく引き受けていただいた住友金属工業株式会社 システム事業部 坂本隆秀部長および平本一男室長ならびに芦田耕司参事補に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 田島道夫：第4回高温エレクトロニクス国際会議報告，第9回高温エレクトロニクス研究会資料

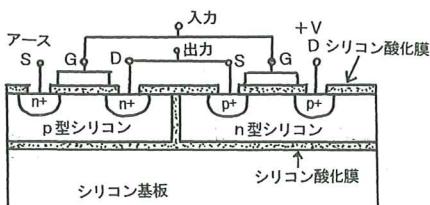


図14 SOI上に形成されたCMOS回路の模式図

P3/9 (1999, 2)

- 2) F. Shi and K. Martin: Prototype Design and Test Results of a High Temperature Remote Actuator Controller, Proceedings of Fourth International High Temperature Electronics Conference P1/4 (1998, 6)
- 3) Burr-Brown Japan, Ltd.: 1996/97 Products Data Book
- 4) 山武ハネウエル社のカタログ: 高温半導体シリーズ 高温用オペアンプ HT1104
- 5) 三菱電機㈱ 技術研修所編: わかりやすい半導体デバイス, オーム社 (1996, 4)
- 6) Fourth International High Temperature Electronics Conference Short Course: Commercial Applications of High Temperature Electronics (1998, 6, 15)